

# Study of Plasma-Surface Interactions on Fusion Materials by Ion Beam Analysis Technique(イオンビーム解析技術による核融合材料におけるプラズマ表面相互作用の研究)

著者	永田 晋二
号	1134
発行年	1987
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9870">http://hdl.handle.net/10097/9870</a>

氏 名	なが 永 田 しん 晋 じ 二
授 与 学 位	工 学 博 士
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 63 年 3 月 25 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 5 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 原子核工学専攻
学 位 論 文 題 目	Study of Plasma-Surface Interactions on Fusion Materials by Ion Beam Analysis Technique (イオンビーム解析技術による核融合材料における プラズマ表面相互作用の研究)
指 導 教 官	東北大学教授 山口 貞衛
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 山口 貞衛      東北大学教授 平林 真 東北大学教授 阿部 勝憲      東北大学教授 松井 秀樹

## 論 文 内 容 要 旨

高温プラズマを取り囲む核融合炉の第一壁は炉心から漏れ出てくるさまざまな粒子による照射を受け、壁材表面とプラズマとの間には複雑な相互作用が生ずる。このうち、燃料である水素同位体が炉心と壁との間を行き来する水素リサイクリングと呼ばれる過程はプラズマの温度、密度、組成、また壁材中のトリチウム滞留量に重大な影響を及ぼす。したがって核融合炉の設計、制御のためには第一壁候補材である低原子番号材料における水素リサイクリングに関するデータが不可欠である。特に、水素同位体の保持・放出挙動は水素リサイクリングに関する過程の中で最も理解が遅れている。本研究の目的はシミュレーションとして水素同位体イオンを第一壁候補材料に注入し、イオン照射下における材料中の水素同位体の挙動及びイオン照射による材料の損耗を 2 MV 程度の加速器を用いたイオンビーム分析法によって調べることである。さらにイオンビーム解析技術を核融合実験炉のプラズマ内不純物分析にも応用することにより、実際のプラズマ・表面相互作用に関する知見を得ることも併せて目的とした。本論文は以下の 8 章から構成されている。

### 第 1 章 序 論

磁気閉じ込め型核融合炉における水素リサイクリング、スパッタリングなどプラズマ・表面相互作用の概略、さらに第一壁材料に要求される条件を述べ、本研究の目的と意義を明らかにしている。

## 第2章 イオンビーム分光法による組成分析

実験方法として用いたイオンビーム解析技術（ラザフォード後方散乱分光法，核反応解析法，反跳粒子検出法）について，その原理を述べている。

## 第3章 固体内水素定量のための $^4\text{He}^+$ を用いた反跳粒子検出法の最適化

固体表面近傍での水素の保持・放出挙動の研究に先立ち，水素同位体の深さ方向の濃度分布を鮮明に精度よく定量するため， $^4\text{He}^+$ を用いた反跳粒子検出法の深さ分解能の測定及び理論的評価，反応断面積の測定を行った。その結果，深さ分解能の理論的評価と測定値にはよい一致がみられ，理論的評価が分解能を向上させる条件を見いだすための目安となることが示された。例えば，ヘリウムイオンの入射角と検出水素の放出角が等しいような配置においては，深さ分解能は広い範囲の深さにわたり一定となる。また，入射角を極端に小さくあるいは大きくとることにより，ごく表面近傍の分解能を向上させることが可能である。

$\text{H}(^4\text{He}, ^4\text{He})\text{H}$ および $\text{D}(^4\text{He}, ^4\text{He})\text{D}$ 反応の微分断面積は1.5～3.0 MeVの $^4\text{He}$ 入射エネルギーについてラザフォード散乱公式で算出される値よりも大きいことが示された。特に， $\text{D}(^4\text{He}, ^4\text{He})\text{D}$ 反応では2.1 MeVに共鳴が存在し，反跳角が小さいときラザフォード微分断面積との比は30倍にも達する。核ポテンシャルの寄与によるこれらの反応断面積のラザフォード散乱からのずれは本研究で初めて明らかにされた。

## 第4章 Be, C, Si およびSiC中にイオン注入された水素同位体の捕捉挙動

水素リサイクリングを評価する上で最も基本となる注入水素の挙動を調べるために，Be, C, Si およびSiC中に5～12.5 keVのエネルギーでイオン注入された水素同位体の深さ方向の濃度分布を反跳粒子検出法を用いて測定し，従来間接的に求められていた飽和濃度を水素濃度分布から直接評価した。またSiCについては，水素注入にともなう損傷分布を $^4\text{He}^+$ ビームを用いたチャネリング実験によって測定し，さらに等時間焼鈍による捕捉水素濃度分布の変化を調べた。

Be, C, Si およびSiCに注入された水素は，注入の初期には飛程の終端で捕捉されるが，やがて水素濃度は限界に達し，注入量とほぼ等量の水素が表面から再放出される飽和状態を示す。この水素イオン注入にともなう濃度分布の変化は現象論的モデルによる計算でよく再現できることを明らかにした。水素濃度分布より直接求めた飽和濃度はBe, C, Si, SiCについてそれぞれ0.15, 0.40, 0.40, 0.50 (H-atoms/host atom)であった。CおよびSiについては報告されている値とよい一致がみられたが，Beについての測定値は間接的に求められた値の約半分であった。SiC中の水素飽和濃度は本研究で初めて測定された。

SiCへの水素注入に伴う損傷分布は，二体衝突近似を用いたMonte-Carlo法にもとづく計算とよく一致するが，格子点よりはじき出されたSi原子の数は計算値（はじき出しエネルギーを25 eVとしたとき）の20倍に達する。SiC結晶はイオン照射により損傷を受け易いことがわかった。SiC中に注入された水素の等時間焼鈍による脱離過程が一次反応であると仮定すると，活性化エネルギーは3.6～4.6 eVと評価された。これより注入水素は母材原子と化学的に結合していることが明ら

かにされた。

## 第5章 Be, C, Si および SiC 中に捕捉された水素同位体のイオン照射にともなう放出

水素が飽和した状態にある第一壁表面は同位体水素および核融合反応で生成されるヘリウムイオンの照射を受ける。第一壁材料におけるトリチウム滞留量とトリチウム除去に関連した問題を考察するため、先に重水素を打ち込んだ試料に引き続き水素イオンを照射することにより生ずる同位体置換、またヘリウムイオンを照射することにより生ずる水素の放出を Be, C, Si および SiC について測定した。さらに、照射後の試料表面を走査型電子顕微鏡で観察し、 $^4\text{He}$  の捕捉量を陽子後方散乱分光法により測定した。

水素同位体置換は Be, C, Si および SiC のいずれに対しても同様に起こり、これら4種類の材料中での同位体置換にともなう水素濃度分布の変化は現象論的モデルによる計算でよく再現できることが明らかになった。また、同位体置換における捕捉水素量の変化は同位体水素の注入量の指数関数で表すことができ、実効的な放出断面積として約  $10^{-18} \text{ cm}^2$  を得た。この値はいずれの材料についても、また水素・重水素の注入の順序を変えた場合もほぼ同じであることが明らかになった。

ヘリウムイオン照射にともなう水素の放出挙動は材料により異なること、また水素保持量が多いとき放出がはやく、水素濃度が低くなると放出が遅くなることが示された。特に C および SiC では放出が非常に遅く、水素濃度が飽和濃度の半分程度になるとほとんど放出が起きない。これは水素とトラップとの間に強い化学的相互作用が存在し、水素が捕捉されるトラップにはヘリウム原子が捕捉されず、優先的に水素が再び捕捉されるためと考えられる。一方、Be や Si 中での水素濃度分布の変化は同位体置換に伴う変化に比較的類似している。このことは Be や Si 中での水素とヘリウムの捕捉状態が似かよっていることを示唆している。

ヘリウムイオン照射後、Be, Si, SiC 中にはヘリウムが保持されていることが確認されたが、C 中にはほとんど存在しないことが示された。また、Si および SiC の表面には水素あるいはヘリウムイオンの照射により生成された  $0.5 \sim 2 \mu\text{m}$  の小孔が観察されたが、Be および C では照射にともなう表面の変化は認められなかった。

## 第6章 炭素、酸素およびネオンイオンによる炭素のスパッタリング

前章までで扱ってきた4種類の材料のうち、炭素材料は現在第一壁表面材料として最も有望とされている。炭素材料の不純物イオン照射による損耗を評価するため、グラファイト、炭素薄膜、さらにトカマク型実験装置に使用されていたグラファイト・リミター片の3種類の試料について、プラズマ中の主な不純物イオンである酸素と炭素によるスパッタリング収率を測定した。従来、炭素のスパッタリング収率は試料の質量の変化から求められていたが、本研究では  $0.5 \sim 14 \text{ keV}$  の入射イオンによりスパッタされコレクタに付着した炭素原子および試料の膜厚の変化を陽子後方散乱分光法によって定量することによりスパッタリング収率を評価した。さらに、酸素イオンによる化学スパッタリングを検証するため、物理スパッタリングのみを起こすと考えられるネオンによる損耗

についても調べた。

試料膜厚の変化から評価された酸素によるスパッタリング収率は入射エネルギーによらずほぼ一定で $Y=0.8\sim0.9$ である。一方、コレクタに付着した炭素原子から評価した値はネオン及び炭素によるスパッタリング収率に近い。このことは物理スパッタリングのほかに $\text{CO}$ 、 $\text{CO}_2$ などのガス生成が起きていることを示唆する。試料膜厚の変化およびコレクタ収量から評価した自己スパッタリング収率はよい一致を示し、この方法がスパッタリング収率の測定に対し有効であることが確認された。また、薄膜およびグラファイト試料における自己スパッタリング収率はほぼ等しく、試料による違いは見られなかったが、グラファイト・リミターでは表面に存在する不純物のためにスパッタリング収率が著しく低下することが明らかにされた。この結果は実際の核融合炉における壁材料の損耗に不純物の存在が重要な役割を果たすことを示している。

## 第7章 グラファイト・プローブによるトカマク型実験装置内の不純物の分析

実験室で研究される単純な条件下でのシミュレーション結果を現実の核融合炉に応用するためには、核融合実験炉に於ける複雑なプラズマ・表面相互作用に関する知見が不可欠である。本研究では、トカマク型実験炉TEXTORに挿入されたグラファイト・プローブをイオンビーム分析することにより、第一壁近傍への不純物粒子束の評価を行った。その結果、金属不純物はリミターのスパッタリングにより生ずること、酸素が最も多い不純物であること、またこれら不純物の挙動がイオンドリフト方向とエレクトロドリフト方向により異なることが示された。さらに、不純物粒子束の放電ガス、リミターの配置、プラズマの温度、密度などのプラズマ・パラメタに対する依存性を明らかにした。

## 第8章 総 括

第3章より第7章までの結果を総括した。

## 審 査 結 果 の 要 旨

プラズマに直接面する第1壁表面とプラズマとの相互作用はプラズマの温度、密度、組成および燃料の装荷量に直接影響を与える。したがって核融合炉を実現するためには、この方面の研究がとくに重要である。本論文はイオンビーム解析法により第1壁の候補材であるBe, C, Si, およびSiCなどの低原子番号材料について、イオン照射下における水素同位体の保持・放出とスパッタリング挙動を明らかにすることを目的として行った研究の成果をまとめたもので、全編8章よりなる。

第1章は序論である。

第2章はイオンビーム分光法による組成分析の原理と解析法を述べている。

第3章では、反跳水素の検出による固体中の水素同位体濃度測定法の開発を目的として行われた、反跳断面積と深さ方向の分解能の測定結果を示している。

第4章は、前章で開発した手法を用いて、Be, C, SiおよびSiC中にイオン注入された水素の深さ方向の濃度分布を測定することにより、これらの材料中における注入水素の保持・放出挙動を調べ、それぞれについて、注入水素の捕捉率、滞留量の最大値を評価している。

第5章では、第1壁材料におけるトリチウム滞留量とトリチウム除去の関連により、先に重水素を打ち込んだ試料に引き続き水素イオンを照射することにより生ずる同位体置換、またヘリウムを照射することにより生ずる水素の放出をBe, C, Si およびSiCについて測定した結果をまとめたものである。同位体置換に関しては標的材料の種類により脱離断面積が殆んど変わらないこと、He照射においては脱離断面積が材料の種類により著しく異なり、特にC, SiCにおいては著しく低い値をとるなどの新しい知見を得ている。

第6章は、炭素材料について、プラズマの主な不純物である炭素と酸素イオンによるスパッタリング収率の入射粒子依存性を測定し、室温における酸素のスパッタリング収率が理論値の2倍以上も大きいことを見出し、これがCOあるいはCO<sub>2</sub>などのガス生成による化学スパッタリングの寄与の加算に原因することを確認している。

第7章では、核融合実験装置において、プラズマ内不純物の粒子束の測定にイオンビーム解析法が有用であることを実証している。

第8章は総括である。

以上要するに本論文は、核融合装置における第1壁表面とプラズマの相互作用、とくに注入水素の保持・放出挙動とスパッタリングに関して種々の実験を行い、多くの知見を得たもので原子核工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。